16/21

ARCHIWUM ODLEWNICTWA
Rok 2006, Rocznik 6, Nr 21(1/2)
ARCHIVES OF FOUNDARY
Year 2006, Volume 6, Nº 21 (1/2)
PAN – Katowice PL ISSN 1642-5308

STRUKTURA I WŁASNOŚCI SKRAWNE CERAMIKI NARZĘDZIOWEJ SI_3N_4 POKRYWANEJ POWŁOKAMI PVD I CVD

D. PAKUŁA[1], L.A. DOBRZAŃSKI[2]
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Politechnika Śląska,
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki badań struktury i własności wielowarstwowych i gradientowych powłok PVD (Physical Vapour Deposition) i CVD (Chemical Vapour Deposition) wytworzonych na podłożu z narzędziowej ceramiki azotkowej Si_3N_4. Przedstawiono kompleksowe wyniki badań na transmisyjnym i skaningowym mikroskopie elektronowym, wyniki badań własności mechanicznych i skrawnych badanych płytek wieloostrzowych.

Key words: PVD; CVD; Multi-layer coating; Multi-component coatings; Gradient coatings; Nitride ceramics; Si_3N_4; TEM; SEM; Micro-hardness; Scratch test; Tool live

1. WSTĘP

Własności użytkowe wielu produktów i ich elementów zależą nie tylko od możliwości przeniesienia obciążeń mechanicznych przez cały czynny przekrój elementu z zastosowanego materiału lub od jego własności fizyko-chemicznych, lecz bardzo często lub głównie od struktury i własności warstw powierzchniowych. Za stosowaniem technologii uszlachetniania warstwy wierzchniej zapewniających wymagane własności użytkowe przy równoczesnym użyciu możliwie tanich materiałów na rdzeń elementu, od którego wymaga się z reguły mniejszych własności użytkowych przemawiają również względy ekonomiczne. Nowoczesne technologie kształtowania materiałów stosowane w obszarach obróbki skrawaniem, obróbki plastycznej, odlewnictwa jak

[1] *dr inż., e-mail: daniel.pakula@polsl.pl*
[2] *prof. dr hab. inż., e-mail: leszek.dobrzanski@polsl.pl*

również kształtowania tworzyw sztucznych wymagają stosowania coraz to bardziej wydajnych materiałów narzędziowych. Wymagania te dotyczą głównie poprawy trwałości oraz niezawodności narzędzi stosowanych w procesach obróbczych, jak również ograniczenia stosowania cieczy obróbkowych powszechnie stosowanych do dzisiaj, silnie jednak degradujących środowisko naturalne. Poprawa własności użytkowych narzędzi oraz zmniejszenie zagrożeń ekologicznych mogą być dokonane przez stosowanie technologii pokrywania narzędzi twardymi powłokami w procesach CVD, a niekiedy także w nowoczesnych procesach PVD, głównie przez poprawę warunków kontaktu trybologicznego w obszarze skrawania oraz wyeliminowania cieczy obróbkowych [1÷6].

Celem niniejszej pracy jest określenie struktury oraz własności skrawnych, odpornych na ścieranie cienkich powłok uzyskanych w procesie PVD i CVD na podłożu z narzędziowej ceramiki na bazie azotka krzemu.

2. PRZEBIEG BADAŃ

Badania wykonano na płytkach wieloostrzowych z ceramiki azotkowej Si_3N_4, niepokrywanych oraz pokrytych w procesach CVD i PVD wielowarstwowymi, wieloskładnikowymi i gradientowymi powłokami odpornymi na ścieranie. Płytki z Si_3N_4 pokryto wielowarstwowo w wysokotemperaturowym procesie CVD kombinacją powłok TiC, Ti(C,N), TiN i Al_2O_3 oraz w procesie PVD – katodowego odparowania łukowego (CAE – Cathodic Arc Evaporation) powłokami typu TiN+-multiTiAlSiN+TiN, TiN+TiAlSiN+TiN, TiN+TiAlSiN+AlSiTiN, które następnie porównano z komercyjnymi płytkami różnych producentów oferujących kombinację pokryć typu Al_2O_3+TiN. Charakterystykę badanych materiałów przedstawiono w tablicy 1.

Badania dyfrakcyjne oraz struktury cienkich folii wykonano w mikroskopie elektronowym prześwietleniowym JEM 3010UHR firmy JEOL, przy napięciu przyspieszającym 300 kV i maksymalnym powiększeniu 300000x. Dyfraktogramy z transmisyjnego mikroskopu elektronowego rozwiązywano z wykorzystaniem programu komputerowego. Cienkie folie wykonano w przekroju wzdłużnym i poprzecznym z płytek o grubości 0,2-0,5 mm, odciętych z próbek litych, z których wycinano krążki o średnicy 3 mm o wstępnie wyszlifowanej i wyrównanej powierzchni. Płytki ścieniano następnie mechanicznie na urządzeniu Disc Grinder do grubości około 80 μm i polerowano jonowo z wykorzystaniem urządzeń firmy Gatan.

Morfologię powierzchni oraz strukturę wytworzonych powłok wykonano na przełomach poprzecznych w skaningowym mikroskopie elektronowym XL-30 firmy Philips. Do uzyskania obrazów przełomów wykorzystano detekcję elektronów wtórnych (Secondary Electrons SE) oraz elektronów wstecznie rozproszonych (Back Scattered Electrons BSE) o napięciu przyspieszającym w zakresie 15-20 kV i maksymalnym powiększeniu 20000x. Badane płytki wieloostrzowe przygotowano do badań nacinając karby i przed łamaniem oziębiając je w ciekłym azocie, dla zapewnienia kruchego przełomu.

Tabela 1. Charakterystyka powłok PVD i CVD naniesionych na ceramikę azotkową Si_3N_4
Table 1. Characteristics of the PVD and CVD coatings deposited on the Si_3N_4 nitride ceramics

Typ powłoki/Rodzaj procesu	Powłoka	Chropowatość Ra, µm	Twardość, GPa	Obciążenie krytyczne L_c, N
jednowarstwowa/PVD	TiN	0,34	22,12	20,14
wielowarstwowa/PVD	TiN+multiTiAlSiN+TiN	0,44	35,24	22,40
wielowarstwowa/gradientowa/PVD	TiN+TiAlSiN+TiN	0,45	23,33	21,65
gradientowa/PVD	TiN+TiAlSiN+AlSiTiN	0,32	26,79	18,30
dwuwarstwowa/CVD	Ti(C,N)+TiN	0,15	22,25	52,15
wielowarstwowa/CVD	Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN	0,28	20,11	26,71
dwuwarstwowa/CVD	TiC+TiN	0,25	19,82	67,24
wielowarstwowa/CVD	TiC+Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN	0,27	29,68	32,17
dwuwarstwowa/CVD	TiN+Al_2O_3	0,45	32,57	83,10
wielowarstwowa/CVD	TiN+Al_2O_3+TiN*	0,13	24,4	47,78
dwuwarstwowa/CVD	Al_2O_3+TiN*	0,25	26,25	44,60
dwuwarstwowa/CVD	Al_2O_3+TiN*	0,23	27,23	26,53
wielowarstwowa/CVD	TiN+Al_2O_3+TiN+Al_2O_3+TiN*	0,60	25,22	40,52
podłoże	ceramika azotkowa Si_3N_4	0,06	18,50	–
*płytki komercyjne różnych producentów				

Własności eksploatacyjne wytworzonych powłok określono na podstawie technologicznych prób skrawania w temperaturze pokojowej. Testy skrawności badanej ceramiki azotkowej wykonano w oparciu o próbę ciągłego toczenia bez użycia obróbkowych cieczy chłodząco-smarujących na tokarce PDF D180. Materiałem poddanym skrawaniu jest żeliwo szare EN-GJL-250 o twardości około 215 HB.

Do ciągłego toczenia zastosowano płytki wieloostrzowe typu SNMN 120408 (oznaczenie wg PN-ISO 1832:1998) mocowane w uniwersalnym uchwycie tokarskim, pozwalającym na zachowanie cech geometrycznych płytki skrawającej.
W badaniach skrawności przyjęto następujące parametry:

- posuw f = 0,2 mm/obr.,
- głębokość toczenia a_p = 2 mm,
- prędkość skrawania v_c = 400 m/min.

Trwałość płytek określono w oparciu o pomiary szerokości pasma zużycia na powierzchni przyłożenia, mierząc średnią szerokość pasma zużycia VB po skrawaniu w określonym przedziale czasu. Próby skrawania przerywano, gdy wartość VB przekroczyła założone kryterium dla obróbki średniodokładnej, tj. VB = 0,3 mm. Pomiarów VB z dokładnością do 0,01 mm dokonano z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego Carl Zeiss Jena przy powiększeniu 10x. Zdjęcia zużycia powierzchni przyłożenia i natarcia płytek skrawających wykonano na mikroskopie świetlnym

LEICA MEF4A przy powiększeniach 50x oraz w skaningowym mikroskopie elektronowym XL-30 firmy Philips, stosując powiększenia 35÷400x.

Badania chropowatości obrobionej powierzchni żeliwa szarego po przeprowadzonych testach eksploatacyjnych wykonano na urządzeniu Surtronic 10 firmy Taylor-Hobson.

Dodatkowo badanymi płytkami skrawano w warunkach laboratoryjnych stop Inconel 718 z następującymi parametrami:

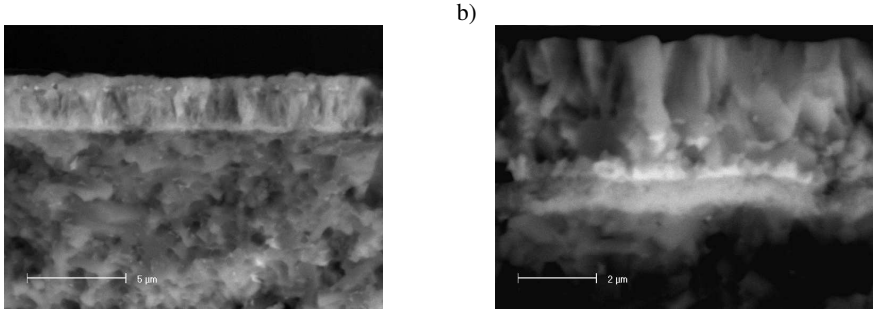
- prędkość skrawania $v_c = 250$ m/min,
- posuw f = 0,2 mm/obr.,
- głębokość skrawania $a_p = 0,5$ mm.

W tym przypadku kryterium zużycia VB = 0,6 mm przyjęto dla nieregularnego pasma zużycia ściernego na powierzchni przyłożenia.

3. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Wszystkie naniesione powłoki PVD i CVD na podłoże z narzędziowej ceramiki azotkowej charakteryzują się strukturą bez porów i nieciągłości oraz szczelnym przyleganiem do siebie oraz całej wielowarstwowej powłoki do podłoża. W przypadku powłok dwuwarstwowych Ti(C,N)+TiN oraz TiC+TiN wyraźnie widoczna jest struktura kolumnowa poszczególnych warstw (rys. 1).

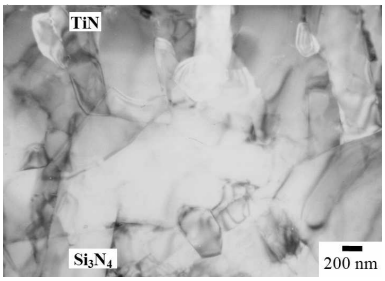
a) b)



Rys. 1. Przełom powłoki a) Ti(C,N)+TiN, b) TiC+TiN naniesionych na podłoże z Si_3N_4
Fig. 1. Fracture surface a) of the Ti(C,N)+TiN, b) of the TiC+TiN coating surface deposited onto the Si_3N_4 nitride ceramics substrate

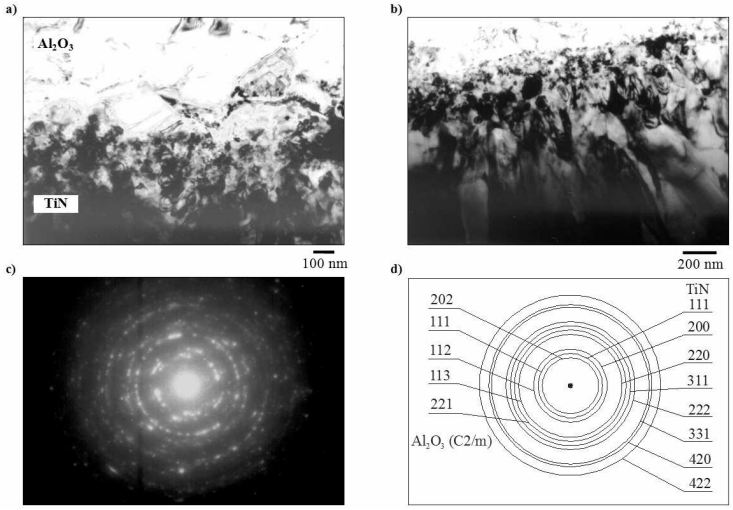
Szczegółowe badania w transmisyjnym mikroskopie elektronowym (cienka folia prostopadła do powierzchni warstwy) pozwalają również stwierdzić taką strukturę kolumnową dla warstwy TiN wchodzącej w skład powłok TiN+Al_2O_3 oraz TiN+Al_2O_3+TiN+Al_2O_3+TiN (rys. 2). Na podstawie tych badań wykazano również, że w przypadku powłoki TiN+Al_2O_3 pomiędzy warstwami TiN i Al_2O_3 istnieje strefa przejściowa, w której znajdują się drobne ziarna tych dwóch faz (rys. 3). W strefie tej stwierdzono również występowanie nielicznych drobnych ziarn Al_2O_3 o strukturze

jednoskośnej (rys. 3c,d), w przeciwieństwie do typowej struktury gruboziarnistej fazy Al_2O_3 o sieci romboedrycznej, która występuje poza tym obszarem granicznym na całej szerokości warstwy. Zaobserwowana strefa przejściowa sprzyja dobrej adhezji (Tablica 1) pomiędzy tymi warstwami, co potwierdza także wysoka odporność na ścieranie tej powłoki.



Rys. 2. Struktura powłoki TiN+Al_2O_3+TiN+Al_2O_3+TiN - podłoże Si_3N_4 + warstwa TiN; cienka folia z przekroju poprzecznego do powierzchni warstwy (TEM)

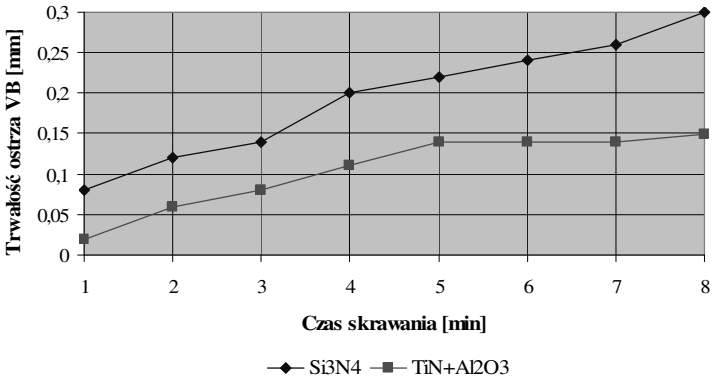
Fig. 2. Structure of TiN+Al_2O_3+TiN+Al_2O_3+TiN coating-deposited on Si_3N_4 substrate + layer TiN; thin foil from cross section of the layer surface (TEM)



Rys. 3. a) Struktura powłoki TiN+Al_2O_3 – b) warstwa TiN + warstwa Al_2O_3; cienka folia z przekroju poprzecznego do powierzchni warstwy (TEM), obraz w polu jasnym, c) dyfrakcja z obszaru TiN jak na rysunku b, d) rozwiązanie dyfraktogramu z rysunku c

Fig. 3. a) Structure of TiN+Al_2O_3 coating: thin foil from cross section of the layer surface (TEM): b) layer TiN + layer Al_2O_3; light field, c) diffraction pattern from the area as in figure b, d) solution of the diffraction pattern from figure c

W wyniku przeprowadzonych prób toczenia żeliwa szarego o twardości około 215 HB ceramiką narzędziową Si_3N_4 stwierdzono wyraźny przeciwzużyciowy wpływ obecności kombinacji powłok Al_2O_3+TiN oraz TiN+Al_2O_3 na okres trwałości płytek skrawających. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy wykres szerokości pasma zużycia VB w funkcji czasu skrawania t. Na początku skrawano płytką Si_3N_4 niepokrytą, która kryterialne zużycie ostrza VB = 0,3 mm dla obróbki średniodokładnej osiąga w 8 minucie ciągłego toczenia (rys. 5a). Ten czas skrawania stanowi bazę porównawczą dla płytek ceramicznych pokrywanych powłokami PVD i CVD. W przypadku płytek skrawających z naniesionymi powłokami PVD opartymi na warstwach TiN oraz TiAlSiN nie zaobserwowano zwiększenia trwałości ostrza, gdyż zniszczenie ostrza następuje w tym samym czasie, co płytki niepokrytej (Tablica 2). Prawdopodobnie na ten fakt wpływa słaba przyczepność tych powłok do podłoża, chociaż twardość np. powłoki TiN+multiTiAlSiN+TiN znacznie przewyższa pozostałe naniesione powłoki (Tablica 1).



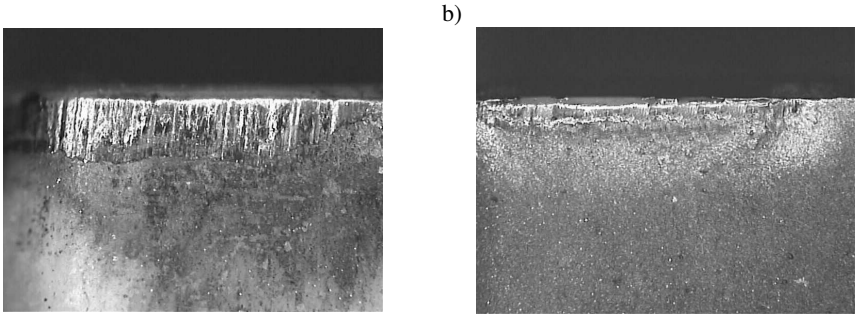
Rys. 4. Wykres zależności pasma zużycia na powierzchni przyłożenia VB od czasu skrawania t dla ceramiki azotkowej Si_3N_4 z naniesioną powłoką TiN+Al_2O_3

Fig. 4. Plot of the VB tool flank life versus machining time t for nitride ceramics Si_3N_4 with deposited TiN+Al_2O_3 coating

Z kolei wśród płytek z powłokami CVD zauważono, że najdłuższy okres trwałości ostrza podczas ciągłego toczenia odpowiada ceramice Si_3N_4 z powłoką TiN+Al_2O_3, dla której szerokość pasma zużycia na powierzchni przyłożenia osiąga wartość VB = 0,16 mm (rys. 5b). Pozostałe płytki z naniesionymi powłokami CVD nie wykazują zmniejszonej szerokości pasma zużycia na powierzchni przyłożenia, a tym samym nie wykazują zwiększonej żywotności ostrza skrawania, chociaż przyczepność tych powłok do podłoża jest zadowalająca, szczególnie w przypadku powłok dwuwarstwowych (tablica 1). Najlepszą trwałością ostrza spośród badanych płytek wykazują płytki komercyjne z kombinacją warstw Al_2O_3+TiN, w przypadku których szerokości pasma zużycia na powierzchni przyłożenia są porównywalne z powłoką TiN+Al_2O_3 i mieszczą się w przedziale VB = 0,10÷0,19 mm po 8 minutach skrawania (Tablica 2). Wszystkie badane płytki charakteryzują się równomiernym pasmem zużycia na powierzchni

przyłożenia, co jest charakterystyczne dla tej grupy materiałów ceramicznych. Podczas tej próby skrawania badane narzędzia wykazują zużycie zgodne z mechanizmem ściernym i adhezyjnym (rys. 6).

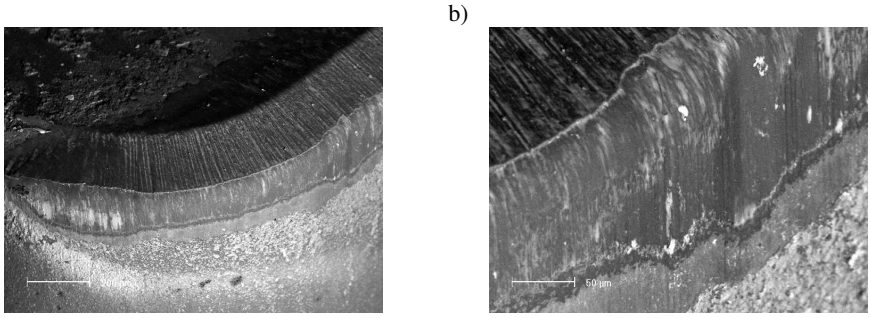
a) b)



Rys. 5. Szerokość pasma zużycia na powierzchni przyłożenia VB ceramiki azotkowej Si_3N_4 a) bez powłoki i b) z powłoką $TiN+Al_2O_3$ – czas skrawania 8 min (pow. 40x)

Fig. 5. Width of the VB tool flank for a) uncoated nitride ceramics Si_3N_4 and b) with the $TiN+Al_2O_3$– after 8 minutes of machining (magnification 40x)

a) b)



Rys. 6. a) Charakter zużycia powierzchni przyłożenia ceramiki azotkowej Si_3N_4, z naniesioną powłoką $TiN+Al_2O_3+TiN$, b) szczegół z rys. a; – czas skrawania 8 min

Fig. 6. a) Tip of the Si_3N_4 nitride ceramics insert coated with the $TiN+Al_2O_3+TiN$ coating, b) characteristic defects – machining time 8 min

Pomiary parametru R_a chropowatości powierzchni obrabianego żeliwa szarego po przeprowadzonych próbach skrawności z założonymi parametrami obróbki (tablica 2), wykazują, że najmniejszą wartością parametru $R_a = 2{,}3$ µm charakteryzuje się powierzchnia żeliwa obrobiona płytką z powłoką $TiN+Al_2O_3$, natomiast największą ceramiką azotkową niepokrytą ($R_a = 5{,}6$ µm). Najlepszą jakość powierzchni uzyskano w wyniku obróbki płytkami z powłoką $TiN+Al_2O_3$ oraz pokrytymi kombinacją powłok Al_2O_3+TiN w procesie CVD.

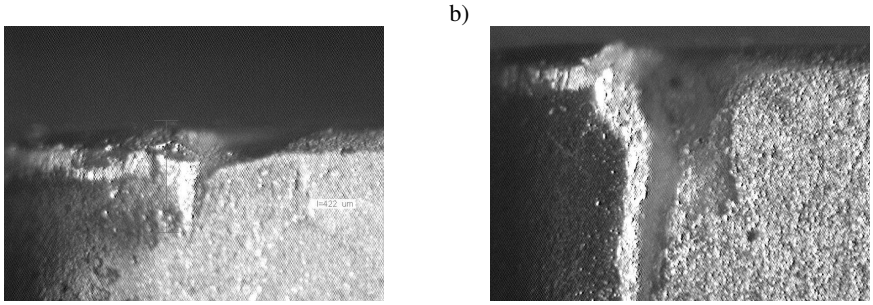
Tabela 2. Zestawienie wartości trwałości ostrza VB po 8 minutach skrawania żeliwa szarego EN-GJL-250 dla ceramiki azotkowej pokrytej i niepokrytej oraz parametru chropowatości R_a obrobionej powierzchni żeliwa szarego EN-GJL-250 po 8 minutach skrawania

Table 2. Summary of the VB tool flank life after 8 minutes of machining of the EN-GJL-250 cast grey iron for the coated and uncoated nitride ceramics and of roughness parameter R_a after 8 minutes of machining of the EN-GJL-250 cast grey iron

Powłoka	Trwałość ostrza VB, mm	Chropowatość, μm
TiN	0.30	2.5
TiN+multiTiAlSiN+TiN	0.28	4.1
TiN+TiAlSiN+TiN	0.30	5.1
TiN+TiAlSiN+AlSiTiN	0.29	5.7
Ti(C,N)+TiN	0.30	4.8
Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN	0.30	4.6
TiC+TiN	0.28	4.3
TiC+Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN	0.30	5.0
TiN+Al_2O_3	0.16	2.3
TiN+Al_2O_3+TiN (1)*	0.17	3.7
Al_2O_3+TiN*	0.16	3.8
Al_2O_3+TiN*	0.19	2.7
TiN+Al_2O_3+TiN+Al_2O_3+TiN*	0.10	2.6
Si_3N_4 – uncoated	0.30	5.6
* płytki komercyjne różnych producentów		

W ostatnim czasie ceramika azotkowa Si_3N_4 znajduje również zastosowanie do obróbki stopów niklu (Inconel). Szukając w tym obszarze nowych możliwości zastosowań materiałów skrawnych do obróbki tychże stopów, wybrano spośród badanych płytek grupę, którą w warunkach laboratoryjnych skrawano stop Inocnel 718. W wyniku tak przeprowadzonych badań stwierdzono, że płytki Si_3N_4 z powłokami TiN+multiTiAlSiN+TiN, TiN+TiAlSiN+TiN osiągają kryterium szerokości pasma zużycia na powierzchni przyłożenia VB = 0,6 mm dla nieregularnego pasma zużycia, odpowiednio po 2 minutach i 1 minucie (rys. 7a). Płytki z powłokami CVD – TiC+Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN i TiN+Al_2O_3 oraz płytki komercyjne z powłokami TiN+Al_2O_3+TiN, TiN+Al_2O_3+TiN+-Al_2O_3+TiN założone kryterium VB = 0,6 mm osiągają po 0,5 minuty skrawania (rys. 7b). Chociaż tym razem płytki z powłokami PVD, gdzie VB_{max} na powierzchni przyłożenia było znacznie mniejsze niż wszystkich badanych płytek, okazują się lepsze aniżeli płytki z powłokami CVD, to otrzymane wyniki skrawania stopu niklu nie zadowalają, bo w warunkach przemysłowych płytka wieloostrzowa z ceramiki azotkowej jednego ze światowych producentów zużywa się po około 15 do 20 minutach skrawania. Zapewne na te wyniki wpływ mają własności skrawalne materiału obrabianego, który cechuje się dużą plastycznością i jest trudny w obróbce, powodując na badanej ceramice z powłokami PVD i CVD nieregularne pasmo zużycia na powierzchni przyłożenia.

a) b)



Rys.7. Szerokość pasma zużycia na powierzchni przyłożenia VB po skrawaniu stopu Inconel dla ceramiki azotkowej Si_3N_4 a) z powłoką TiN+multiTiAlSiN+TiN – czas skrawania 1.5 min. i b) z powłoką TiN+Al_2O_3 _ czas skrawnia 0.5 min. (pow. 50x)

Fig. 7. Width of the VB tool flank for nitride ceramics Si_3N_4 with deposited a) TiN+multiTiAlSiN+TiN coating – after 1.5 minutes of the nickel alloys machining and b) with deposited TiN+Al_2O_3 coating – after 0.5 minutes of the nickel alloys machining (magnification 50x)

4. PODSUMOWANIE

Powłoki PVD i CVD nałożone na podłoże z narzędziowej ceramiki azotkowej, jak wykazują badania, także w transmisyjnym mikroskopie elektronowym na cienkich foliach, w tym prostopadle do powierzchni warstwy, charakteryzują się strukturą bez porów i nieciągłości oraz szczelnym przyleganiem do siebie oraz całej wielowarstwowej powłoki do podłoża. W przypadku powłok dwuwarstwowych Ti(C,N)+TiN oraz TiC+TiN wyraźna jest struktura kolumnowa poszczególnych warstw. Strukturę kolumnową wykazuje również warstwa TiN wchodząca w skład powłok TiN+Al_2O_3 i TiN+Al_2O_3+TiN+Al_2O_3+TiN. W powłoce TiN+Al_2O_3 pomiędzy warstwami TiN i Al_2O_3 występuje strefa przejściowa, w której znajdują się drobne ziarna obydwu tych faz.

Na podstawie wykonanych badań skrawności żeliwa szarego stwierdzono, że nanoszenie przeciwzużyciowych powłok CVD na ceramice narzędziowej na bazie Si_3N_4 powoduje zwiększenie ich odporności na zużycie ścierne, co wpływa bezpośrednio między innymi na wydłużenie okresu trwałości ostrza skrawającego. Termodynamicznie stabilne warstwy Al_2O_3 są barierą dyfuzyjną pomiędzy narzędziową płytką a spływającym po niej wiórem, co w efekcie zwiększa odporność płytki na zużycie. Warstwy TiN ułatwiają natomiast odpływ wióra z obrabianego materiału przez zmniejszenie tarcia pomiędzy obrabianym przedmiotem a wieloostrzową płytką tnącą. Powyższe wyniki pozwalają sądzić, że nanoszenie powłok na badany materiał i związany z tym wyraźny wzrost mikrotwardości warstwy wierzchniej wpływa hamująco na szybkość zużycia powierzchni przyłożenia badanych materiałów narzędziowych.

Podczas próby skrawania stopu Inconel ceramika azotkowa pokryta powłokami PVD – TiN+multiTiAlSiN+TiN i TiN+TiAlSiN+TiN wykazuje lepsze własności

skrawne – gdyż VB_{max} na powierzchni przyłożenia tych płytek jest zdecydowanie mniejsza aniżeli dla wybranych płytek z powłokami CVD, a w szczególności z Al_2O_3+TiN oraz TiN+Al_2O_3. Niestety słaba przyczepność powłok PVD determinuje żywotność ostrza narzędzia. Reasumując wyniki tych prób skrawania, należy podkreślić, że ciągle są szanse w przyszłości zastąpienia powłok CVD przez powłoki PVD osadzane na ceramice azotkowej Si_3N_4. Zapewne te szanse zwiększą się ze zmianą parametrów i modernizacją procesów PVD.

PODZIĘKOWANIA

Badania zostały wykonane częściowo w ramach projektu zamawianego KBN PBZ-100/4/T08/2004 kierowanego przez Prof. L.A. Dobrzańskiego.

LITERATURA

[1] Z. Peng, H. Miao, W. Wang, S. Yang, Ch. Liu, L. Qi: Surface and Coatings Technology 166 (2003) 183-188.
[2] L.A. Dobrzański: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego*, WNT,Warszawa, (2002).
[3] D. Pakuła: *Struktura i własności wielowarstwowych powłok PVD i CVD odpornych na ścieranie na azotkowej ceramice narzędziowej*, Praca doktorska niepublikowana, Bibl. Gł. Pol. Śl., Gliwice, (2003).
[4] Y. Sahin, G. Sur: Surface and Coatings Technology, 179 (2004) 349-355.
[5] K.A. Senthil, D.A. Raja, T. Sornakumar: International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 21 (2003) 109-117.
[6] L.A. Dobrzański, D. Pakuła: Inżynieria materiałowa, 3, (2004) 568-571.

STRUCTURE AND CUTTING PROPERTIES OF THE CERAMIC TOOL MATERIALS BASED ON SI_3N_4 COATED PVD AND CVD COATINGS

SUMMARY

Comprehensive structure and properties investigation results of the multilayer, gradient PVD and CVD coatings developed on the nitride tool ceramics substrate are presented in the paper. The detailed results are presented of examinations carried out on the scanning and transmission electron microscopes, as well as of the mechanical properties and cutting tests of the investigated inserts.

Recenzował: prof. Jan Szajnar.